

研究室だより

未知核種探索から核変換処理研究まで

名古屋大学アイソトープ総合センター
(工学研究科マテリアル理工学専攻量子エネルギー工学分野)

応用核物理グループ

柴田 理尋

i45329a@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

将来期待される核変換処理や核融合などの核エネルギーの開発・利用へ向け、高品質な核データを自分たちの手で整備すること目指し、名古屋大学にある 3.75MV バンデグラーフ加速器をはじめ、京都大学原子炉 (KUR) 及び原子力機構 (JAEA) 原科研のタンデム加速器を利用し、未知原子核の探索と不安定原子核の崩壊核分光、中性子による核反応断面積の測定及びそれらに伴う γ 線の精密測定法の開発など、「放射能」の創製・測定を中心に研究しています。併任先の工学研究科マテリアル理工学専攻量子エネルギー工学分野の学生とともに、21 世紀 COE プログラム「同位体が拓く未来—同位体科学の基盤から応用まで—」(拠点リーダー:山本一良教授) の中で「同位体の創製」を分担しつつ、以下のような研究テーマに取り組んでいます。

2. 研究内容

(1) 崩壊核分光の研究：未知核種の探索と原子質量の決定

加速器駆動未臨界炉による核変換処理では、未知な原子核がたくさん創られる可能性があります。それらが崩壊するときに放出する放射線及び核構造に関する核データを自前で測定することは、安全性はもとより基礎研究に裏付けられた技術開発として重要です。崩壊核データの中でも崩壊エネルギー (Q_β) と半減期は、原子核の存在限界を予測するなど核物理学上基本的な物理量である上、崩壊熱の評価のために工学上も必要です。

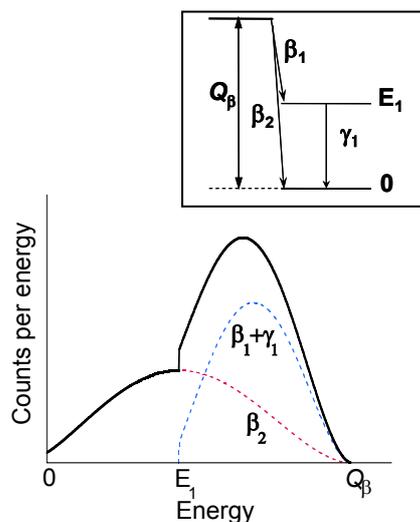


図 1 全吸収型検出器の概念

Q_{β} は壊変前後のエネルギー差すなわち質量差ですから、 Q_{β} を測れば（娘核の質量がわかっているならば）原子質量を決めることができます。オンライン同位体分離装置（Isotope Separator Qn-Line = ISOL）を用いて新核種を探索し、半減期、 Q_{β} を決定するとともに、不安定核の崩壊核分光によって低エネルギーの原子核構造の研究を行っています。ここでは、最近特に力を入れている Q_{β} 測定について紹介します。

従来私たちは Q_{β} をプレーナー型 Ge 検出器で崩壊に伴う β 線を測定して決定してきましたが、安定線から離れるに従って収率が落ち、新核種の場合、数本の γ 線と半減期がやっと測れる程度で、さらに統計量が必要な Q_{β} を測ることは不可能でした。そこで、2つのタイプの全吸収型検出器を開発し、 Q_{β} の測定を可能にしました。全吸収型検出器の特長は図1に示すように、 β 線とそれに引き続いて放出される γ 線のすべてを検出することができるため、エネルギースペクトルの最大値が Q_{β} になり、新同位元素など収率が小さく崩壊図式の情報が不完全でも Q_{β} を決定できるということです。全吸収型検出器の1つは、大型 BGO シンチレーション検出器（直径 12cm、厚さ 10cm）2台を向かい合わせた全吸収型検出器（図2左）です。これは、高い検出効率の BGO シンチレータで放射線源を挟み込むことによって崩壊に伴う放射線のほぼ全エネルギーを吸収できます。もう1つは、中心部分に貫通孔を持つ特別製の HPGe 検出器（結晶のサイズは直径 8.5cm、厚さ 9cm、貫通孔の直径 2cm）の周りに反同時計数用の BGO シンチレーション検出器を配置した形の全吸収型検出器（図2右）です。こちらは、不安定核ビームを打ち込んだ薄いテープを HPGe 検出器の中心部分まで導入し高い立体角で測定できるうえ、HPGe 検出器で散乱した成分を BGO 検出器で反同時計数して全吸収成分のみを測ることができます。BGO 全吸収型検出器に比べ効率は落ちますがエネルギー分解能良く測れます。



図2 JAEA-ISOL に設置した BGO 全吸収型検出器（左）と KUR-ISOL に設置した HPGe 全吸収型検出器（右）。中心部分にはいずれも不安定核を打ち込んだ薄いテープが走っている。

これらを用いた実験は、京大原子炉及び原子力機構原科研のタンデム加速器に附置した ISOL を用いてウランの核分裂生成物から中性子過剰な希土類核を質量分離・測定しています。京大原子炉の KUR-ISOL では ^{235}U の熱中性子による核分裂生成物から質量数 150 程度を、タンデム加速器の Tokai-ISOL では 20~30MeV 程度に加速した陽子による ^{238}U の核分裂生成物から質量数 160 程度以上を対象としています。図 3 は、ここ数年に測定した核種です。最近では、Tokai-ISOL で質量数 160 以上の Eu 同位元素を新たに同定し、その Q_β を決定しました。図 3 右上のスペクトルはそのうちの一つ ^{162}Eu の全吸収スペクトルです。一方、時間情報を取り込むことによって半減期も同時に決定できますので、従来不可能であった新核種の半減期と Q_β を同時に決定することを可能にしたわけです。1 個 2 個ではだめですが、10 個程度測って質量公式やシステムティクスと比較すると、その領域での傾向が見えてきます。それは詳細な核分光研究の動機付けになります。また、半減期の予測は Q_β に大きく依存しますので半減期の予測モデルの検証には極めて有効です。このように実験データが理論モデルの改善や精密化に貢献できると考えています。原子質量は最近ではイオントラップなどによる質量測定の精度が向上し Q_β 測定を行うグループは少なくなりましたが、このような基本的な物理量はいろいろな方法で測定し値が一致することが重要だと考えています。この研究は、原子力機構、京大原子炉、広島大学と協力して行っています。Tokai-ISOL では新たなイオン源を開発中であり、より重い中性子過剰核の探索を計画中です。従来の系統性の枠組みを超える新たな現象に期待し、協力して Q_β 測定を継続して行く予定です。

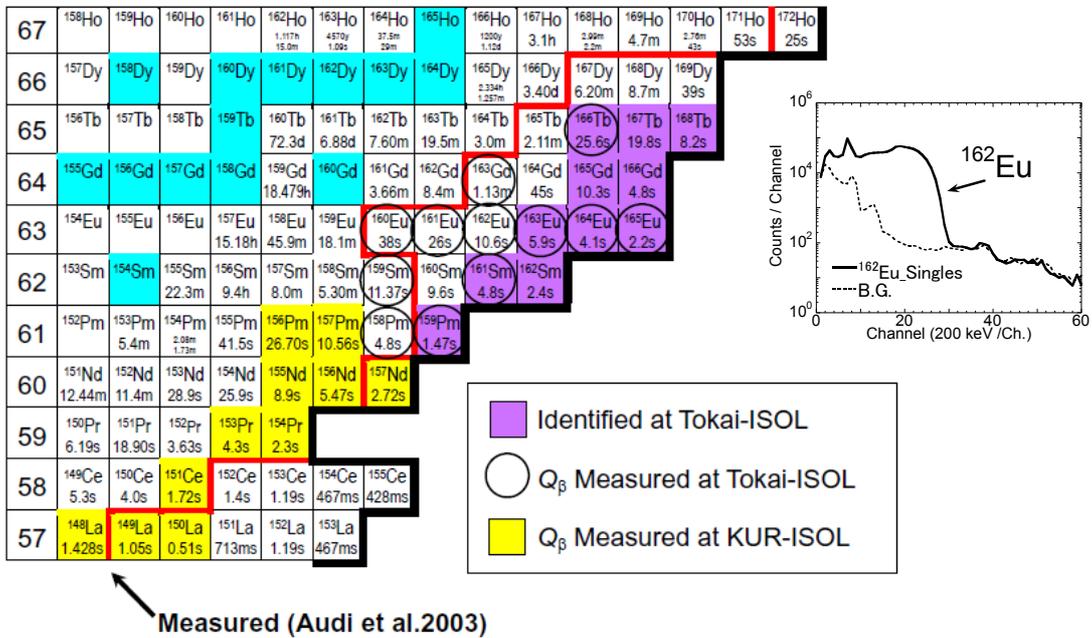


図 3 KUR-ISOL 及び Tokai-ISOL で測定した新核種及び Q_β を決定した核種。赤い線の左側は Q_β の測定値がある核種。右上は、BGO 全吸収型検出器で測定した ^{162}Eu のスペクトル。

(2) 中性子による放射化断面積の測定：新しい系統式の提案を目指して

名古屋大学にある加速電圧 3.75MV のバンデグラフ加速器 (図 4) では、重水素ビームと重水素ガスターゲットを用いて 5MeV 程度の中性子を発生させ、(n,p)、(n,n')反応等の放射化断面積を測定しています。14MeV 領域の放射化断面積は、いろいろな系統式が報告されていますが、5MeV 領域は利用できる中性子源が少ないため測定データが欠落しており、系統式がありません。バン



図 4 名古屋大学のバンデグラフ加速器。手前が重水素ガスターゲットのビームライン。

デグラフ加速器はこの領域の中性子を発生させるのに適しています。気送管を用いて試料を照射室と測定室の間を往復させ、誘導放射能を測定して半減期が数分程度の放射化断面積を決定していますが、周囲の構造物による散乱中性子の影響が大きいため実験及びシミュレーションで丁寧に補正する必要がありますが、一貫した手法で測定した自分たちのデータに基づいて系統式を提案することを目指しています。既に測った反応の例を図 5 に示します。いずれも過去に測定データのない反応です。 $^{29}\text{Si}(n,p)^{29}\text{Al}$ 反応は JENDL や ENDF などの評価値と比較的一致しています。一方、 $^{79}\text{Br}(n,p)^{79\text{m}}\text{Se}$ 反応では、評価値より小さめの値になっていますが、これはもう少し測定点を増やす必要があります (JENDL の評価値は $^{79\text{m}}\text{Se}$ 全生成断面積なので大きくなっています)。

小型の加速器ですが、新しいデータが出せる重要な装置です。名大の装置ですので、教育も兼ね、維持・管理を学生主体で行い真空技術や工作技術も身に着けながら実験しています。デフレクターをつけて数ミリ秒のパルスにするなどビームラインを改良して、測定対象を拡張しようと工夫しています。

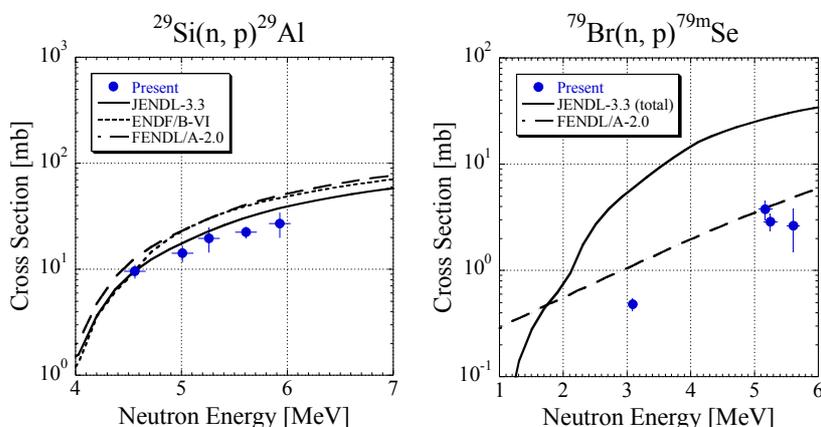


図 5 名古屋大学バンデグラフ加速器で測定した中性子放射化断面積の励起関数

(3) 中性子捕獲反応断面積測定と捕獲 γ 線の精密測定

核変換処理では中性子を長半減期核種に捕獲させ短半減期核種へ変換することを目的としていますが、そのためには捕獲反応断面積を精度良く測定する必要があります。京都大学原子炉の熱中性子導管を用いて中性子捕獲即発 γ 線強度を決定するとともに、断面積の決定を目指しています。捕獲 γ 線は 10MeV 程度に及ぶため通常の崩壊 γ 線では検出器の検出効率を十分な精度で較正できません。 ^{14}N の捕獲 γ 線は 10MeV 程度まで適当なエネルギー間隔で放出されるので標準反応とされてきましたが、最近、従来正しいとされていた γ 線強度に系統的なずれがあることを見出しました。また、同位体存在比が 100% である Mn、Co、Pr について捕獲 γ 線によって決めた捕獲断面積と、生成した β 壊変核種の崩壊 γ 線を用いて決めた捕獲断面積と比較すると、報告されている捕獲 γ 線強度が系統的にずれていることもわかってきました。この原因には、検出効率の決定に用いた標準反応の γ 線強度のほかに、低エネルギーの検出効率を高エネルギー側まで外挿するなど検出効率の決め方にも問題があるようです。そこで、1 次標準としての $^{14}\text{N}(n,\gamma)^{15}\text{N}$ 反応の捕獲 γ 線を精度良く決定したうえで、それを用いて検出器の検出効率を較正し捕獲 γ 線強度を決定します。さらに、断面積が大きい $^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$ 反応の捕獲 γ 線を 2 次標準とすべく解析を行っています。2 次標準としての $^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$ の捕獲 γ 線は HPGe 検出器の検出効率の較正にとっても有用です。また、捕獲 γ 線を完全に測定することは通常の見出し器ではほとんど不可能なので、測りきれない γ 線の影響を考慮して断面積を決める解析手法を現在開発中です。

3. 終わりに

以上のような検出法の開発や検出効率の決定、中性子の散乱の評価などのために、EGS、GEANT、MCNP などのモンテカルロシミュレーションを用いて計算しています。私たちは統計精度の良い実験データを持っていますので、シミュレーションと比較するとシミュレーションがどの程度実験と一致しないかもだんだんわかってきました。一方、バンデグラフ加速器を用いると(p, γ)、(p, α)反応などで高エネルギー γ 線を発生させることが出来ますので、検出器の較正や予備実験が充分行えます。大学ではシミュレーションと小型加速器を効果的に利用しユニークな検出器と測定技術の開発を通して学生の教育に取り組み、充分腕を上げて大型装置を用いた実験を提案するというスタイルで、今後も「放射能」を主体とした研究に取り組んで行こうと考えています。